

激光选区熔化成形钛合金底座断裂分析

江龙, 张超群, 王宣, 吕晓刚

中国空空导弹研究院 河南洛阳 471000

摘要: 激光选区熔化 (Selective Laser Melting, SLM) 成形Ti-6Al-4V底座在试验过程中发生断裂失效, 通过断口宏观检测、扫描电镜及能谱分析、化学成分分析、金相分析及CT检测等方法对断裂的底座进行了分析。结果表明: SLM成形Ti-6Al-4V底座U形槽内部存在大量未熔合缺陷, 导致该部位承载能力下降, 在试验中瞬间冲击载荷的作用下发生了过载断裂。由此提出建议: 加强打印过程中在线质量监控, 识别与分析可能的风险源, 强化过程检测控制质量; 针对X射线和荧光检测未检出未熔合缺陷的问题, 建议在原机械加工后增加工业CT抽检工序。

关键词: 激光选区熔化; Ti-6Al-4V; 未熔合缺陷; 过载断裂

Fracture analysis of laser selective melting forming Ti-6Al-4V base

JIANG Long, ZHANG Chaoqun, WANG Xuan, LÜ Xiaogang

China Airborne Missile Academy, Luoyang 471000, Henan, China

Abstract: The Ti-6Al-4V base formed by Selective Laser Melting (SLM) experienced fracture failure during the experimental process. The fractured base was analyzed by macroscopic fracture inspection, scanning electron microscopy and energy spectrum analysis, chemical composition analysis, metallographic analysis, CT detection and other methods. The results showed that there were a large number of incomplete fusion defects inside the U-shaped groove of the Ti-6Al-4V base formed by SLM, which led to a decrease in the load-bearing capacity of the area. Under the action of instantaneous impact load in the experiment, overload fracture occurred. And put forward suggestions: First, Strengthen online quality monitoring during the printing process, identify and analyze possible risk sources, and enhance process detection and quality control; Second, To address the issue of undetected lack of fusion defects in X-ray and fluorescence testing, it is recommended to add an industrial CT sampling process after the original mechanical processing.

Keywords: selective laser melting; Ti-6Al-4V; unfused defects; overload fracture

1 序言

Ti-6Al-4V是一种中等强度的 α + β 钛合金, 含有6% α 相稳定元素Al和4% β 相稳定元素V。该合金具有卓越的综合性能, 可以在400℃高温环境中长时间工作, 应用广泛。尽管需求量很大, 但由于其导热性差, 应变硬化倾向强, 以及容易与氧发生

化学反应, 因此使制备的Ti-6Al-4V产品一直具有挑战性, 并且传统的制造工艺总是不可避免地造成大量材料浪费, 制造成本高, 交货周期长^[1]。在这种情况下, 激光选区熔化 (Selective Laser Melting, SLM) 技术为具有复杂几何形状的Ti-6Al-4V产品的制造提供了解决方案。与传统制造方法相比, SLM

成形技术最显著的优势在于其可以直接从原材料粉末中制造具有复杂结构的零件，而不需要通过挤压、锻造、铸造和二次加工等传统制造方法来实现所需的形状^[2]。

目前，相关学者对SLM成形TC4钛合金的质量进行了研究。陈健等^[3]研究表明，增大激光功率、减小扫描速度及增大扫描间距可以减少孔洞缺陷数量，减小缺陷尺寸，以及提高相对密度；杨圣昆等^[4]采用顺序拼接和相邻层间条带相对偏转改善了双激光选区熔化拼接区域的成形质量；闫泰起等^[5]研究表明，当铺粉层厚为40 μm 、激光功率为200W、扫描速度为1500mm/s、扫描间距为0.065mm时，致密度最高，可达99.993%。但在实际工业生产过程中，由于一些不可控因素（能量不足、粉末质量不均匀等），SLM成形构件内部不可避免地存在气孔及未熔合缺陷等。

某厂家采用SLM技术生产的Ti-6Al-4V底座在试验过程中发生断裂，主要加工过程为：粉末预处理→激光选区熔化成形→去应力退火→力学性能检测→荧光检测→X射线检测→后续机械加工及表面处理。为查明断裂原因，笔者对断裂底座进行了一系列检测和分析，并提出了改进建议，以减少此类故障发生。

2 宏观检测

失效底座断裂位置位于底座中间U形槽根部附近，如图1a所示。整个断面宏观形貌如图1b所示，

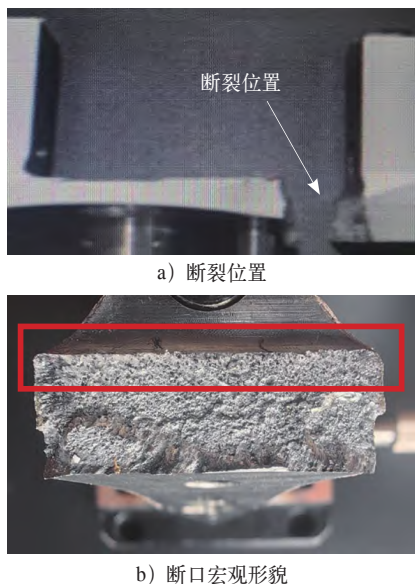


图1 失效底座断裂位置及宏观形貌

由图1b可看出，无明显宏观塑性变形，其中靠底座上侧断面（框区域）相对平坦，其他区域较粗糙，靠底座下侧断面主要为剪切唇特征，靠左侧的断面也存在一定的剪切唇特征。因此，可以推断开裂主要是从宏观形貌的右上方（底座上侧）开始向下扩展，然后在宏观断口的下侧和最左侧部位发生最后断裂。

3 化学分析

在失效底座断口附近取样，采用X射线荧光光谱仪和氧氮氢分析仪进行化学成分分析，失效底座主要化学成分见表1，符合GB/T 34486—2017《激光成型用钛及钛合金粉》的技术要求。

表1 化学成分（质量分数）（%）

元素	Al	V	C	Fe	O	N	H
实测值	5.60	3.94	0.014	0.0416	0.095	0.0065	0.0012
标准值	5.5~6.75	3.5~4.5	≤0.08	≤0.30	≤0.19	≤0.05	≤0.015

4 断口扫描电镜及能谱分析

通过扫描电镜（SEM）对失效底座断口进行观察，断口宏观形貌如图2所示。由图2可知，断面存在平滑、粗糙两种主要特征区域，其中平滑区域为未熔合缺陷，在未熔合缺陷表面上随机分布有较多球形颗粒物，且球形颗粒物尺寸 $<55\mu\text{m}$ 。经测量，断面上最大未熔合缺陷长轴尺寸为1135 μm 、短轴尺寸为357 μm 。对粗糙区域放大观察，微观均呈剪切唇形貌，如图3所示。

对断口表面和球形颗粒物分别进行能谱分析

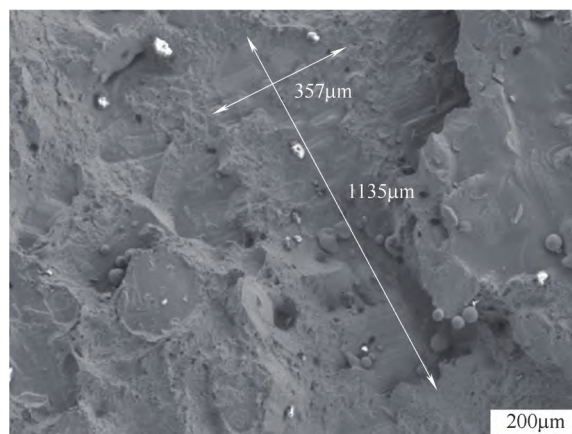


图2 失效底座断口SEM宏观形貌

(见图4、图5)，两者的主要合金元素为Ti、Al、V，含量差距不大，未见明显异常元素，结合球形颗粒物尺寸判断其为SLM成形铺粉所用的Ti-6Al-4V未熔融的粉末。

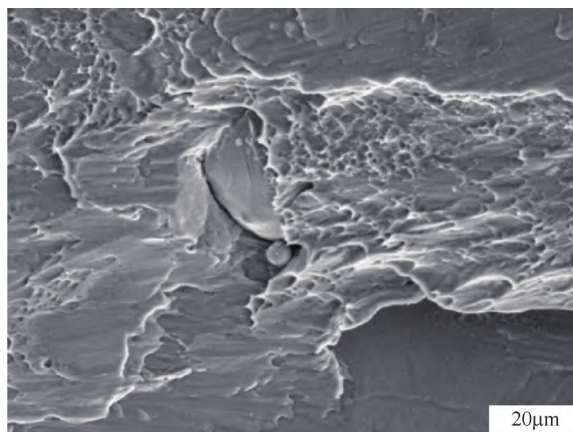


图3 失效底座断口SEM微观形貌

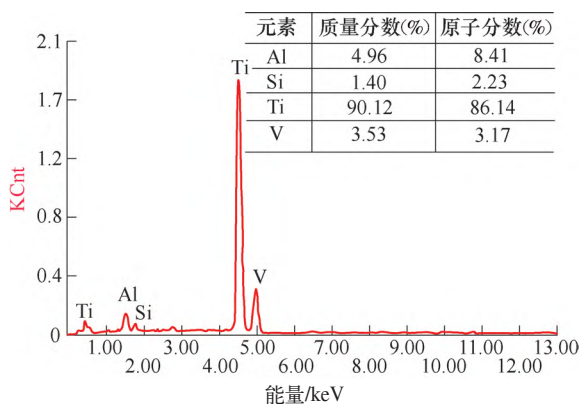


图4 失效底座断口能谱分析结果

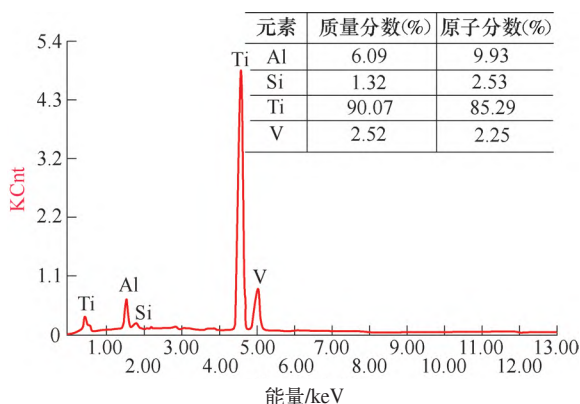


图5 球形颗粒物能谱分析结果

5 金相分析

对失效底座进行金相分析，分别取断口附近垂直于沉积方向与平行于沉积方向的金相试样，抛光态金相组织如图6所示。从图6可看出，垂直于沉积

方向抛光态金相组织中存在较多形状不规则的楔形孔洞，且孔洞边缘存在尖锐角；平行于沉积方向抛光态金相组织中的孔洞呈条带状平行分布，两侧也存在尖锐边缘。试样不同方向孔洞的形状分布存在明显差异，说明孔洞主要出现在SLM成形过程中层与层之间的交界处，呈现扁平的条带状。



a) 垂直于沉积方向



b) 平行于沉积方向

图6 失效底座断口附近抛光态金相组织

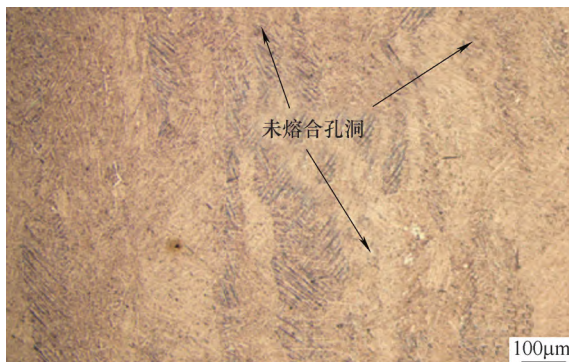
使用钛合金显微腐蚀液 ($\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}=1:2:50$) 对断口附近金相试样进行腐蚀，金相组织如图7所示。从图7可观察到，垂直于沉积方向存在形状规则的等轴 β 晶粒，晶粒内部分布有板条状 α 相，呈网篮组织；平行于沉积方向在多层沉积面上沿沉积方向存在延伸生长的 β 相柱状晶， β 相晶粒的宽度约为 $100\mu\text{m}$ ，原始 β 相晶粒粗大，晶界清晰， β 相晶粒的晶界上有晶界 α 相， β 相晶粒内的显微组织由一系列针状 α' 马氏体相、板条 α 相与 α 板条之间的 β 相组成，板条状的 α 相相互编织组成网篮组织，金相组织未见明显异常。

6 高精度工业CT检测

SLM成形钛合金工件缺陷无损检测方式通常采用荧光检测和X射线检测，但由于工件结构复杂，



a) 垂直于沉积方向



b) 平行于沉积方向

图7 失效底座断口附近显微组织形貌

未熔合缺陷主要存在于层铺面的结合处，缺陷较扁平，且内部存在未熔合填充粉末，这就导致荧光检测和X射线检测难以检测出工件内部存在的未熔合缺陷。

对故障件断口附近进行取样，采用高精度工业CT进行逐层扫描并三维重建，检测结果如图8所示。从图8可看出，故障件断口附近存在大量未熔合缺陷及气孔，其中气孔形状规则、尺寸较小，未熔合缺陷形状不规则、尺寸较大，断口附近最大的未熔合缺陷等效直径约为952μm。

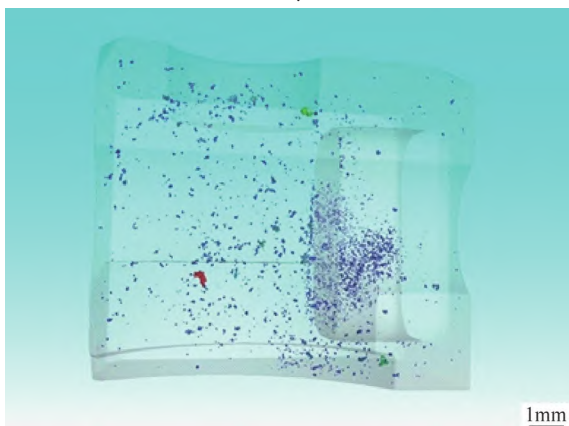


图8 故障件CT检测结果

7 分析与讨论

失效底座的化学成分符合GB/T 34486—2017《激光成型用钛及钛合金粉》中的技术要求，金相组织垂直于沉积方向为等轴晶网篮组织，平行于沉积方向为柱状晶网篮组织，可见少量 α' 马氏体相，因此可以排除原材料及热处理问题导致底座断裂的可能。

结合宏观观察和微观观察结果可以发现，失效底座无明显宏观塑性变形，断裂从U形槽内部位置开始起裂，向其他位置扩展，方向从底座上侧向底座下侧扩展。微观上整个断面主要为未熔合和剪切韧窝特征，未熔合区域上随机分布有球形颗粒物，结合能谱分析结果，球形颗粒物为未熔融的Ti-6Al-4V粉末，断面未发现明显的腐蚀、疲劳、氢脆等断裂特征。因此，底座失效主要是由于存在未熔合缺陷，导致工件在试验过程中因冲击性能下降而发生过载断裂。

未熔合孔洞与气孔不同，未熔合孔洞往往更大，在不同方向上呈不规则楔形或带状，两端尖端锋利^[6]。这些孔洞一般分布在相邻两层的交界处，留下薄的扁平“裂纹”。当SLM成形工艺参数不稳定导致偏离最佳熔化条件时，容易产生未熔合缺陷^[7-9]。例如，试图熔化过多的粉末时，若激光能量不足，则会导致熔合不足，层间结合弱；若铺粉不均匀，则存在局部高点^[10]；当搭接率过小时，两道之间的重叠区域激光能量密度过低，因而导致搭接区不能充分熔合；当Z轴增量大于单层铺粉厚度时，两者之间的差对于成形过程而言是一种正反馈，将使成形过程逐步偏离平衡，可造成层与层之间结合的致密程度变差，产生层间熔合不良的现象^[11]。未熔合孔洞的长轴通常垂直于沉积方向。当承受荷载作用时，特别是在与沉积方向垂直的冲击荷载作用下，这些孔隙的尖端容易产生局部应力集中，导致过早破坏^[12]。

由于未熔合孔洞缺陷对增材制造产品的性能影响十分严重，因此需要对产品内部的未熔合缺陷进行严格把控，加强打印过程中在线质量监控，识别和分析打印过程中的风险源，强化过程检测控制质量，发现打印异常应及时做出反应。除了加强打印过程监测之外，还应严格对工件进行无损检测，但荧光检测工序在打印后毛坯状态下进行，由于毛坯

表面较为粗糙,会对荧光结果的显示产生干扰及误判,并且不能反映内部未熔合孔洞缺陷分布情况;X射线检测分辨力较低,未熔合孔洞内部填满了金属粉末或熔敷金属,虽然存在较大尺寸未熔合孔洞,但是透照厚度差极小,另外由于工件形状结构复杂,射线检测时在三维空间上难以找到合适检测角度,容易造成错检,因此必要时可以采用高精度工业CT进行检测。

8 结束语

SLM成形Ti-6Al-4V失效底座存在未熔合缺陷,显著降低了工件的承载能力,在使用过程中发生了过载断裂,针对失效底座内部存在的未熔合缺陷提出以下建议。

1) 加强打印过程中在线质量监控,识别与分析可能的风险源,强化过程检测控制质量。

2) 针对X射线和荧光检测未检出未熔合缺陷的问题,建议在机械加工后增加工业CT抽检工序。

参考文献:

- [1] HUANG R, RIDDLE M, GRAZIANO D, et al. Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components[J]. J. Clean. Prod., 2016, 135: 1559-1570.
- [2] 孙小峰, 黄洁, 荣婷, 等. Ti-6Al-4V合金激光选区熔化及热处理性能影响研究[J]. 金属加工(热加工), 2021(8): 1-6.
- [3] 陈健, 傅高升, 陈鸿玲, 等. 选区激光熔化成形工艺对多孔TC4钛合金显微组织的影响[J]. 机械工程材料, 2023, 47(11): 96-103.
- [4] 杨圣昆, 谢印开, 胡全栋, 等. 拼接顺序对双激光选区熔化成形TC4钛合金成形性的影响[J]. 航空制造技术, 2022, 65(5): 93-99.
- [5] 闫泰起, 陈冰清, 梁家誉, 等. 激光选区熔化TC4钛合金成形质量优化研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(17): 327-335.
- [6] DE FORMANOIR C, MICHOTTE S, RIGO O, et al. Electron beam melted Ti-6Al-4V: microstructure, texture and mechanical behavior of the as-built and heat-treated material[J]. Mater. Sci. Eng.: A, 2016, 652: 105-119.
- [7] TAMMAS-WILLIAMS S, ZHAO H, LÉONARD F, et al. XCT analysis of the influence of melt strategies on defect population in Ti-6Al-4V components manufactured by selective electron beam melting[J]. Mater. Charact., 2015, 102: 47-61.
- [8] VILARO T, COLIN C, BARTOUT J D. As-fabricated and heat-treated microstructures of the Ti-6Al-4V alloy processed by selective laser melting[J]. Metall. Mater. Trans. A, 2011: 42(10): 3190-3199.
- [9] GAYTAN S M, MURR L E, MEDINA F, et al. Wicker Advanced metal powder based manufacturing of complex components by electron beam melting[J]. Mater. Technol., 2009, 24(3): 180-190.
- [10] 唐超兰, 温竟青, 张伟祥, 等. 钛合金SLM成形成形技术及缺陷[J]. 航空材料学报, 2019, 3(1): 38-47.
- [11] 张霜银, 林鑫, 陈静, 等. 工艺参数对激光快速成形TC4钛合金组织及成形质量的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(10): 1839-1843.
- [12] LI P H, GUO W G, HUANG W D, et al. Thermomechanical response of 3D laser-deposited Ti-6Al-4V alloy over a wide range of strain rates and temperatures[J]. Mater. Sci. Eng.: A, 2015, 647: 34-42.

(收稿日期: 20250116)

《金属加工(热加工)》2025年第8期广告目次

单位名称	查询编号	位置
易孚迪感应设备(上海)有限公司	1492	封面
昆山京群焊材科技有限公司	5123	封二
北京金威焊材有限公司	1161	封三
盐城高周波热炼有限公司	5326	封底